

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Monika Barta**

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

Mentor:

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić, dipl. ing.

Student:

Monika Barta

Zagreb, 2015.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentorici prof. dr. sc. Tanji Jurčević Lulić na razumijevanju i izdvojenom vremenu te danim savjetima. Također se zahvaljujem dr. sc. Jasni Leder Horina na vodstvu, stručnim savjetima i pomoći tijekom izrade završnog rada.

Monika Barta



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodostrojarški i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Monika Barta** Mat. br.: 0035187205

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Određivanje centra rotacije zuba kod ortodontske terapije**  
Naslov rada na engleskom jeziku: **Determination of the centre of rotation of tooth during orthodontic treatment**

Opis zadatka:

Potrebno je odrediti centar rotacije jednokorijenskog zuba kod ortodontske terapije. Koristeći CT snimke zuba pacijenta kojemu je preporučena ortodontska terapija, izraditi 3D geometriju zuba i njegove okoline. Model treba obuhvatiti zub te alveolnu kost koja se sastoji od kortikalne kosti i spužvaste kosti. Potrebno je razmotriti utjecaj hvatišta, odnosno položaja bravice ortodontskog aparata, i veličine ortodontske sile na položaj centra rotacije kod nekontroliranog naginjanja zuba. Analizu provesti metodom konačnih elemenata. Opterećenje i svojstva materijala pojedinih dijelova modela definirati na temelju vrijednosti dostupnih u literaturi i u dogovoru s mentorom.

U radu treba navesti korištenu literaturu i dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

5. svibnja 2015.

Zadatak zadao:

Prof.dr.sc. Tanja Jurčević Lulić

Rok predaje rada:

2. rok: 17. rujna 2015.

Predviđeni datumi obrane:

2. rok: 21., 22., i 23. rujna 2015.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof.dr. sc. Igor Balen

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA .....	III
POPIS OZNAKA .....	IV
SAŽETAK .....	V
1 UVOD .....	1
1.1 Podjela zubi .....	1
1.2 Građa zuba.....	2
1.2.1 Anatomska građa zuba .....	2
1.2.2 Histološka građa zuba .....	3
1.2.3 Potporna tkiva.....	4
1.3 Biomehanika gibanja zuba .....	6
1.3.1 Opis parametara zuba.....	6
1.3.2 Gibanje zuba .....	7
1.3.3 Ortodontska biomehanika.....	9
1.4 Mehanička svojstva zubnih tkiva.....	9
2 METODOLOGIJA RADA.....	13
2.1 Mimics Medical 17.0 .....	13
2.2 Abaqus 6.10.....	14
2.3 Metoda konačnih elemenata .....	14
2.4 3D model zuba.....	16
2.4.1 Mehanička svojstva.....	16
2.4.2 Mreža konačnih elemenata .....	17
2.4.3 Opterećenja i rubni uvjeti.....	18
2.4.4 Analiza 3D modela zuba .....	20
3 REZULTATI .....	21
4 DISKUSIJA .....	23
5 ZAKLJUČAK.....	24
6 LITERATURA .....	25

## POPIS SLIKA

Slika 1.1. Raspored trajnih zubi [6].....	2
Slika 1.2. Građa zuba [7] .....	3
Slika 1.3. Dentin [9] .....	4
Slika 1.4. Zubna pulpa [11].....	4
Slika 1.5. Prikaz parodonta [14].....	5
Slika 1.6. Djelovanje sile na centar otpora rezultira translacijom [15] .....	6
Slika 1.7. Različita lokacija centra otpora ovisi o potpori parodonta [15] .....	6
Slika 1.8. Različiti položaji centra rotacije .....	7
Slika 1.9. Translacija drugog pretkutnjaka na mjesto prvog pretkutnjaka [15] .....	7
Slika 1.10. Rotacija kutnjaka [15] .....	7
Slika 1.11. Nekontrolirano naginjanje [15] .....	8
Slika 1.12. Kontrolirano naginjanje [15] .....	8
Slika 1.13. Prikaz fiksnog aparata za zube s metalnom bravicom [16].....	9
Slika 1.14. Usporedba mehanički svojstava kosti s drugim materijalima [19].....	10
Slika 2.1. Prikaz maske zuba u tri ravnine.....	13
Slika 2.2. 3D model zuba.....	14
Slika 2.3. Često korišteni 3D elementi: a) heksaedarski element prvog reda, b) heksaedarski element drugog reda, c) tetraedarski element drugog reda [22] .....	15
Slika 2.4. Osnovni tetraedarski konačni element [22].....	16
Slika 2.5. Prikaz mehaničkih svojstava .....	17
Slika 2.6. Mreža konačnih elemenata cijelog modela .....	18
Slika 2.7. Udaljenosti hvatišta sila od vrha krune zuba.....	19
Slika 2.8. Prikaz opterećenja i uklještenja na jednoj slici za sve četiri analize .....	19
Slika 3.1. Pomak $u_2$ kod hvatišta 1 .....	21
Slika 3.2. Pomak $u_2$ kod hvatišta 2.....	21
Slika 3.3. Pomak $u_2$ kod hvatišta 3.....	22
Slika 3.4. Pomak $u_2$ kod hvatišta 4.....	22
Slika 4.1. Ovisnost položaja centra rotacije o položaju hvatišta sile .....	23

**POPIS TABLICA**

Tablica 1.1. Vrijednosti modula elastičnosti [18] .....	11
Tablica 1.2. Vrijednosti Poissonovog koeficijenta [18] .....	12
Tablica 2.1. Mehanička svojstva materijala analiziranog modela [23], [24].....	16

**POPIS OZNAKA**

Oznaka	Jedinica	Opis
$E$	MPa	Modul elastičnosti
$\nu$	-	Poissonov koeficijent
$u, v$ i $w$	mm	Pomaci u smjeru x, y i z osi
$F$	N	Sila
$a_i$	mm	Udaljenost hvatišta sile $F_i$
$z_i$	mm	Udaljenost centra rotacije kod djelovanja sile $F_i$
$u_2$	mm	Pomak zuba u smjeru globalne osi y



## SAŽETAK

Ovim radom analiziran je utjecaj položaja bravice ortodontskog aparata na položaj centra rotacije jednokorijenskog zuba, točnije desnog gornjeg sjekutića. Prvi je korak bio dobivanje 3D modela zuba i njegove okoline na temelju CT snimaka nepoznatog pacijenta u programskom paketu Mimics Medical 17.0. Okolina zuba obuhvaća alveolnu kost koja se sastoji od kortikalne i spužvaste kosti. Daljnja analiza se vršila u programskom paketu Abaqus 6.10 metodom konačnih elemenata. Ortodontska sila iznosila je 5 N, a analiza je provedena za tri različita, proizvoljno odabrana, položaja bravice ortodontskog aparata.

**Ključne riječi:** CT snimke, gornji desni sjekutić, ortodontski aparat, metoda konačnih elemenata, centar rotacije

# 1 UVOD

Zubi su kalcificirani organi koji se nalaze na početku probavnog trakta, u usnoj šupljini [1]. Služe za držanje, trganje i usitnjavanje (griženje i žvakanje) hrane. Položaj zubi u čeljustima i njihov oblik određen je genetskom determinantom, ravnotežom sila mišića obraza i jezika, silama žvakanja te različitim silama koje djeluju tijekom rasta i razvoja. Zubi se unutar zubnih lukova nalaze u neutralnom položaju u kojem je djelovanje svih sila izjednačeno ili približno jednako nuli [2].

Različiti poremećaji u djelovanju tih sila utječu i na položaj zubi u čeljusti te njihove međusobne odnose [2]. Zbog toga može doći do naginjanja zuba u lijevu ili desnu stranu ili pomicanja prema naprijed ili nazad. Kako bi se zub vratio u neutralni položaj, pacijentu se određuje nošenje fiksnog ortodonskog aparata.

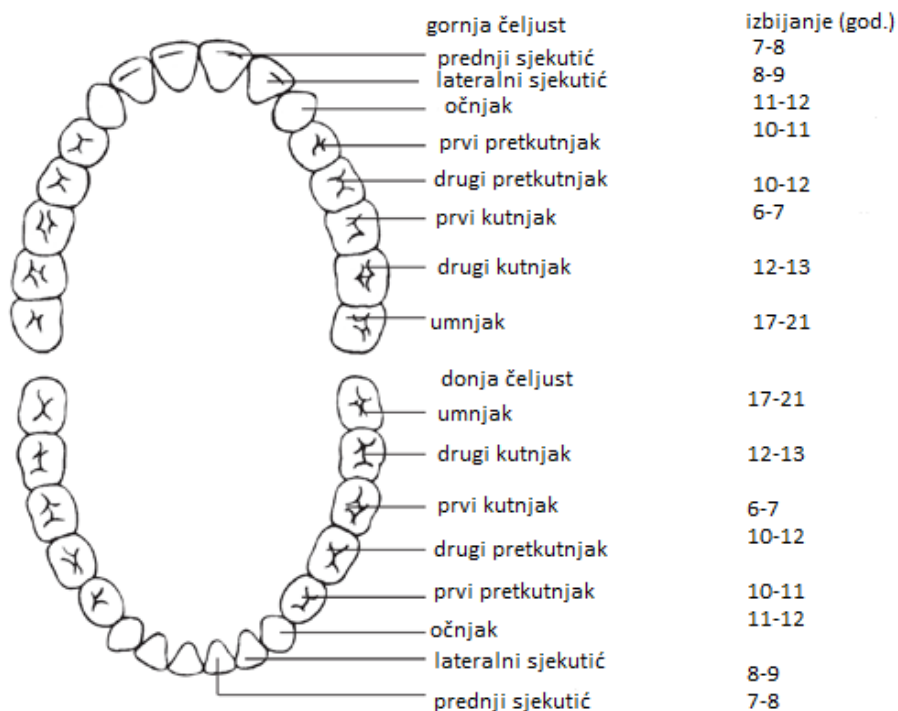
Fiksni ortodontski aparat sastoji se od bravica koje se lijepe na svaki pojedini zub i žice koja povezuje bravice. Žica prolazi kroz utor na svakoj bravici i proizvodi blagu silu koja pomiče zube prema pravilno oblikovanom zubnom luku, uz istovremeno preoblikovanje koštanog tkiva u kojem se zub nalazi [3].

## 1.1 Podjela zubi

Prvi zubi se pojavljuju negdje oko četvrtog mjeseca starosti bebe do prve godine života i nazivamo ih mliječni zubi. U normalnih uvjetima imamo 20 mliječnih zubi: 8 sjekutića, 4 očnjaka, 4 prva kutnjaka i 4 druga kutnjaka. U šestoj godini života mliječna denticija prelazi u mješovitu jer su istovremeno prisutni i mliječni i trajni zubi. Na mjesto mliječnih zubi dolaze njihovi trajni nasljednici, tako da se prvo zamjenjuju donji prednji zubi, potom slijede gornji prednji, a nakon njih stražnji zubi. Potpuno razvijena trajna denticija broji 32 zuba: 8 sjekutića, 4 očnjaka, 8 pretkutnjaka i 12 kutnjaka, što je prikazano na slici 1.1. [4].

Druga podjela zubi je prema morfološkom obliku. Dije se na: sjekutiće (*lat. incisor*), očnjake (*lat. canin*), pretkutnjake (*lat. praemolar*) te kutnjake (*lat. molar*). Sjekutići sjeckaju i prerezuju hranu prilikom žvakanja, ima ih 4 u gornjoj i 4 u donjoj čeljusti. Očnjaci odvajaju sjekutiće i pretkutnjake te kidaju hranu prilikom žvakanja, a ima ih po 2 komada u gornjoj i u donjoj čeljusti. Pretkutnjaci se nalaze između očnjaka i kutnjaka, a funkcija im varira. Ne postoje mliječni pretkutnjaci. Funkcija kutnjaka je da prilikom žvakanja samelju hranu [5].

Postoji i podjela prema položaju u dentalnom luku na gornje i donje zube (sjekutići i očnjaci), desne i lijeve zube te prednje i bočne zube (pretkutnjaci i kutnjaci) [5].



Slika 1.1. Raspored trajnih zubi [6]

Posljednja podjela je prema korijenu zuba na jednokorijenske (sjekutići, očnjaci i pretkutnjaci s izuzetkom gornjeg prvog premolara), dvokorijenske (gornji prvi pretkutnjak i svi donji kutnjaci) i trokorijenske zube (gornji kutnjaci) [1].

## 1.2 Građa zuba

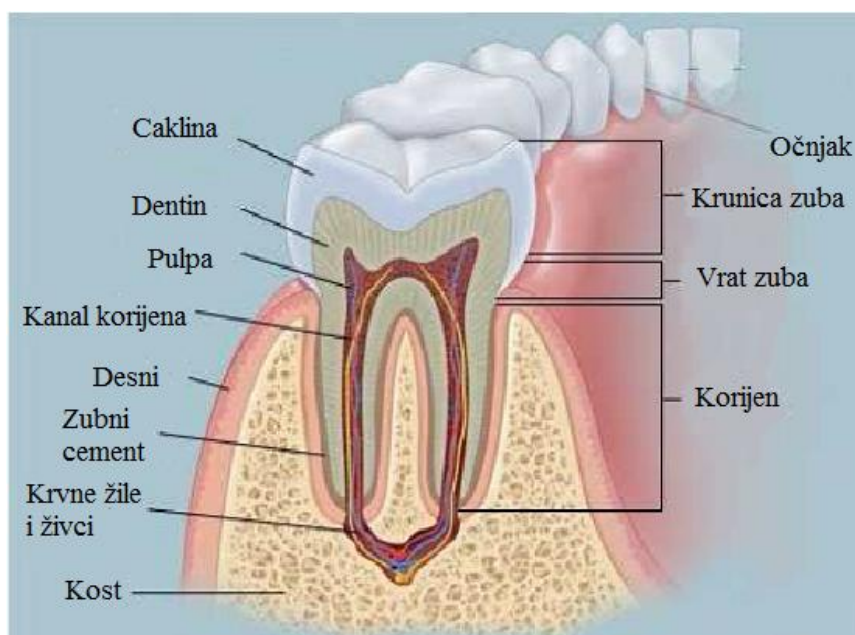
### 1.2.1 Anatomska građa zuba

Na svakom zubu se razlikuju tri osnovna dijela i to su kruna, vrat i korijen [1].

**Kruna zuba** se nalazi u usnoj šupljini i ona je vidljivi dio zuba. Prekrivena je caklinom koja štiti i obavlja unutarnji dio zuba – dentin, koji je mekani i osjetljiviji.

**Vrat zuba** je dio na kojem kruna prelazi u korijen. To je suženje u razini zubnog mesa koji se još naziva i cementno-caklinski spoj.

**Korijen zuba** učvršćuje zub u koštanoj čašici, koja se naziva alveola, tako da se svaki zub nalazi u poziciji relativno u odnosu na ostale u dentalnom luku. Broj i veličina korijena se razlikuje od zuba do zuba.



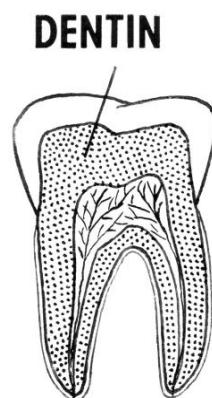
Slika 1.2. Građa zuba [7]

### 1.2.2 Histološka građa zuba

Zub se sastoji, na histološkoj razini, od tri glavna tvrda dijela: cakline, cementa i dentina, te mekog tkiva zubne pulpe kao što je prikazano na slici 1.2.

**Zubna caklina** je složena i veoma čvrsta supstanca koja prekriva i štiti dentin u predjelu krune zuba [8]. Sadrži 4-6% organskih i 94-96% anorganskih tvari, a najbolje je razvijena na griznoj površini [1]. To je najtvrdi dio zuba (i najtvrdije tkivo u ljudskom organizmu uopće), ali je veoma krhka. Sastoji se od pretežno šestorokutnih caklinskih prizmi, tj. velikih i jako zbijenih kristala kalcij-hidroksiapatita za koji su vezani ioni Ca-karbonata, Mg-karbonata i kalcij-fluorida. Boja cakline varira od svijetlo žute do sivkasto bijele boje.

**Dentin** (slika 1.3.) je glavna supstanca zuba. Jedno je od čvrstih tkiva koja izgrađuju zub. Okružuje zubnu pulpu, a prekriven je caklinom u području krune i cementom u području korijena. Oko 20% dentina je organska matrica, većinom kolagen s malo elastina. Anorganski dio (70%) je većinom hidroksiapatit s ionima karbonata, magnezija i fluorida [8]. Boja mu varira od žućkaste do bijelo-sive. Specifičnost dentina je da je njegovo stvaranje moguće tijekom cijelog životnog vijeka zuba.



Slika 1.3. Dentin [9]

**Zubna pulpa** je vezivno-tkivni organ koji sadrži veliki broj struktura, kao što su arterije, vene, limfni sustav i živci (slika 1.4.). Njegova primarna funkcija je tvorba dentina. Kada zub raste, pulpa je velika; progresivno se smanjuje kako se zub bliži kraju svog rasta. Pulpa je relativno velika kod mliječnih zubi i u mlađih trajnih zubi. Zubi djece i mladih ljudi su osjetljiviji na promjenu temperature i zubarske operativne zahvate nego zubi starijih ljudi [10].



Slika 1.4. Zubna pulpa [11]

### 1.2.3 Potporna tkiva

Tkiva koja pružaju potporu zubima nazivaju se jednim imenom parodont. Slika 1.5. prikazuje gingivu, cement, parodontni ligament i alveolnu kost [1].

**Cement** je tanki sloj mineraliziranog tkiva koje prekriva vanjsku površinu korijena zuba. U njega su uložene kolagene niti koje učvršćuju zub u alveoli. Sadrži 32% organskih (kolagena vlakna i osnovna tvar) i 68% anorganskih tvari [12].

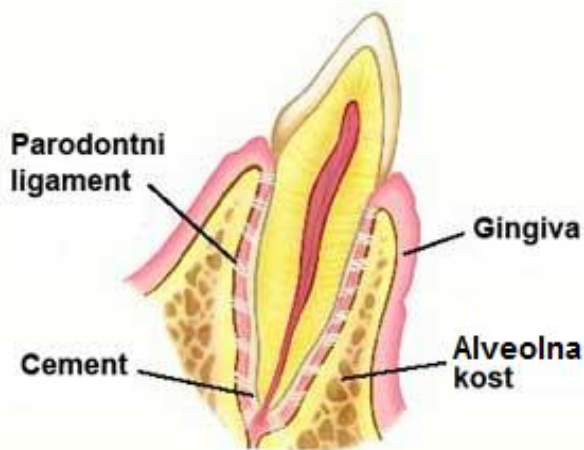
**Gingiva** je sluznica kojom je pokrivena alveolna kost (dio čeljusti koji nosi zube) [13]. Ona pridrži i učvršćuje zub. Oblaže vrat zuba, a proteže se i duž korijena zuba te je svjetlo-ljubičaste boje [12].

**Parodontni ligament** je gusto vezivno tkivo koje kao dio parodonta osigurava vezivanje zuba putem njegovog cementa na okolnu alveolnu kost. Prostor između kosti i zuba naziva se parodontalni prostor i u njemu se nalaze stanice, krvne i limfne žile te živci [12].

**Alveolna kost** se može definirati kao koštano tkivo koje ima zadatak okružiti i učvrstiti zube. Ona se razvija tijekom nicanja zuba i resorbira se po njegovom gubitku. Građena je od 45% anorganskog dijela (kristali hidroksiapatita i amorfni kalcij-fosfat), 35% organskog dijela i 20% vode. Izvana je prekrivena gingivom, a u njezinim alveolama smješteni su korijeni zubi. Sastoji se od zbite (kortikalne) i spužvaste (spongiozne) kosti [12].

Kortikalna kost je čvrsta vanjska koštana ovojnica. Kost izgrađuju paralelni snopovi kolagenih vlakana koji sadrže kristale hidroksiapatita. Građena je od koštanih lamela koje okružuju Haversove kanale kroz koje prolaze krvne žile.

Trabekularna kost izgleda kao trodimenzionalna rešetka sastavljena od koštanih gredica koje se nazivaju trabekule. Šupljine moraju zauzimati više od 30% volumena da bi kost bila klasificirana kao trabekularna.

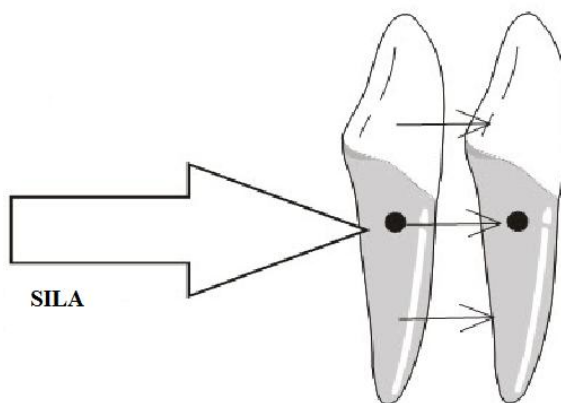


Slika 1.5. Prikaz parodonta [14]

### 1.3 Biomehanika gibanja zuba

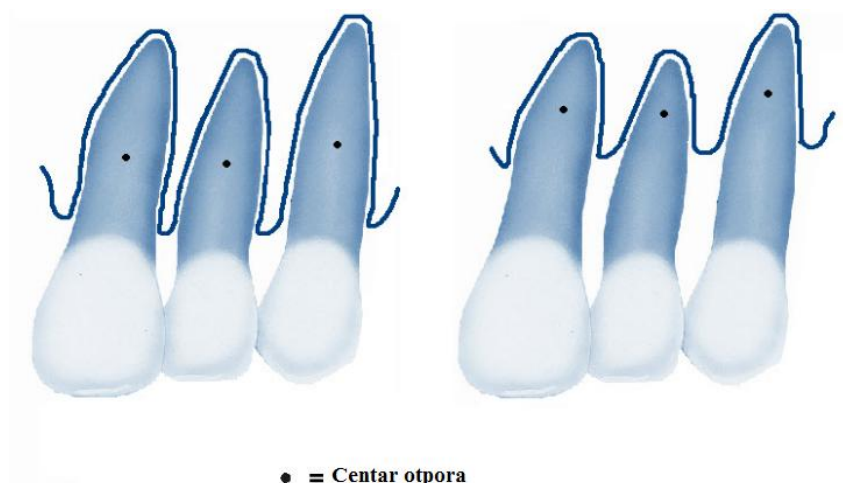
#### 1.3.1 Opis parametara zuba

Centar otpora (slika 1.6.) je točka na tijelu u kojoj sila, koja djeluje u toj točki, rezultira translacijom tijela [15].



**Slika 1.6. Djelovanje sile na centar otpora rezultira translacijom [15]**

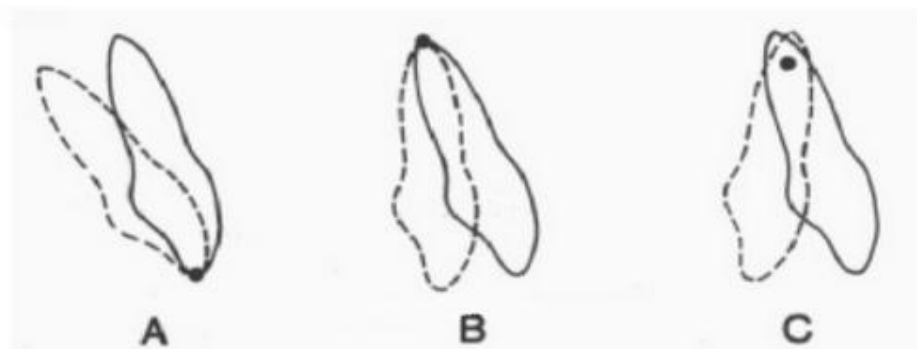
Nadalje, centar otpora je različit za različite zube s različitom duljinom korijena i anatomijom. Njegova pozicija također ovisi o visini alveolne kosti pa će biti različita kod djece i odraslih koji imaju bolesti parodonta (centar otpora se pomiče prema vrhu kod odraslih koji nemaju kost) što prikazuje slika 1.7. To znači da, kada bi se jednake sile postavile na različite zube, ili kod različitih ljudi, bio bi drugačiji efekt [15].



**Slika 1.7. Različita lokacija centra otpora ovisi o potpori parodonta [15]**

Centar rotacije (slika 1.8.) je točka oko koje se tijelo rotira, tj. točka na osi koja ostaje nepomična tijekom gibanja. Ona ovisi o položaju centra otpora i sili koja djeluje na tijelo.

Čista rotacija se događa kada se centar otpora i centar rotacije podudaraju. Čista translacija se događa kada je centar rotacije beskonačno udaljen od centra otpora [15].

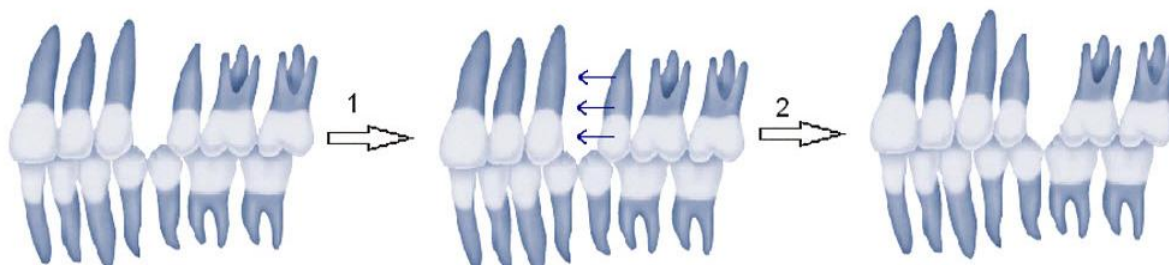


**Slika 1.8. Različiti položaji centra rotacije**

### 1.3.2 Gibanje zuba

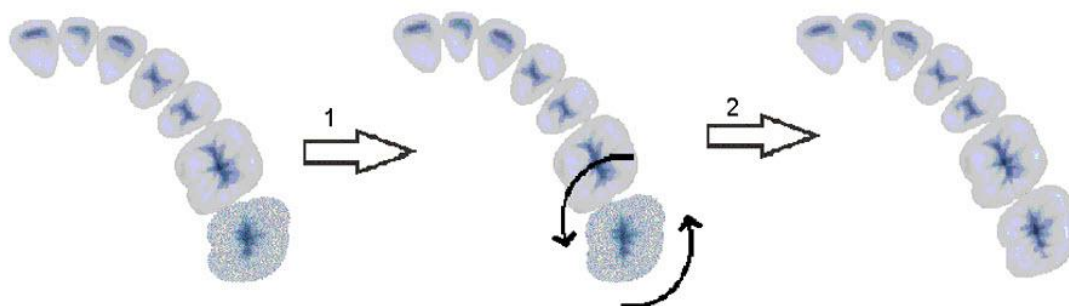
Zub se može translirati, rotirati i naginjati.

Tijekom translacije, sve točke na zubu pomiču se u istom smjeru i za isti pomak (slika 1.9.). Centar rotacije je na beskonačnoj udaljenosti od zuba jer nema rotacije [15].



**Slika 1.9. Translacija drugog pretkutnjaka na mjesto prvog pretkutnjaka [15]**

Čista rotacija (slika 1.10.) nastupa kada se tijelo rotira oko centra otpora [15].

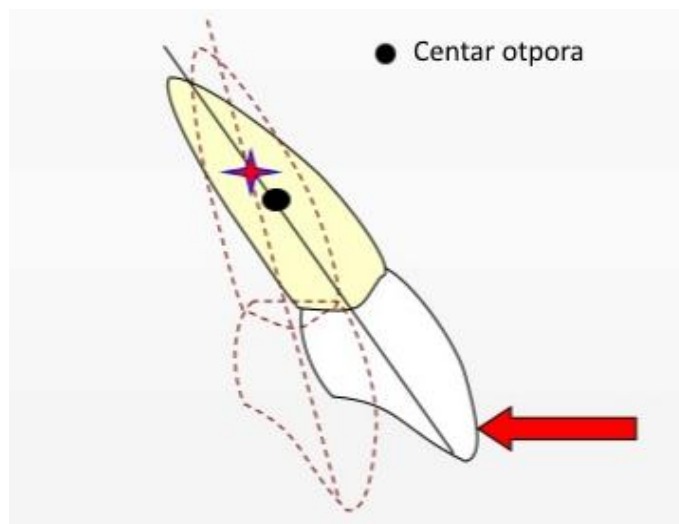


**Slika 1.10. Rotacija kutnjaka [15]**



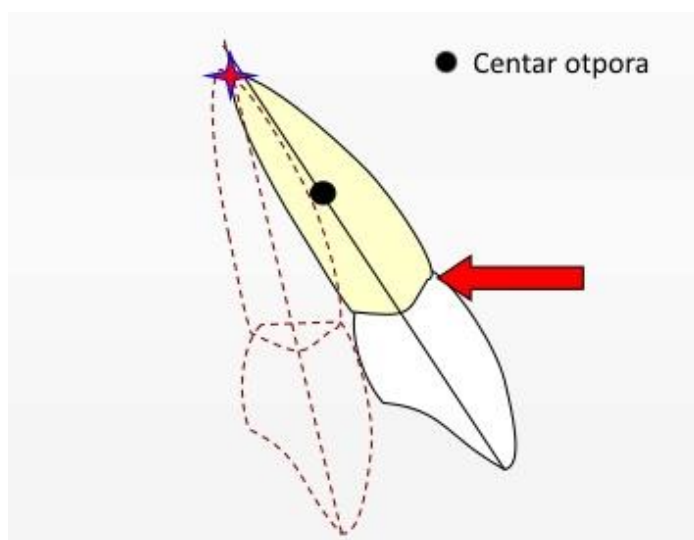
Naginjanje zuba ovisi o mjestu na kojem djeluje sila [15]. Stoga postoje dva tipa naginjanja: nekontrolirano, kakvo se javlja u ovoj analizi zuba, i kontrolirano.

- Nekontrolirano naginjanje (slika 1.11.) se javlja kada je sila smještena na kruni zuba. Pritom se kruna giba na jednu stranu, dok korijen zuba ide u drugu stranu. Centar rotacije je blizu centru otpora pa se zub naginje oko centra otpora [15].



**Slika 1.11. Nekontrolirano naginjanje [15]**

- Kod kontroliranog naginjanja (slika 1.12.) kruna zuba se giba u smjeru sile, ali pozicija korijena ostaje ista ili se minimalno pomakne. Centar rotacije se nalazi na vrhu korijena i oko njega se zub naginje.



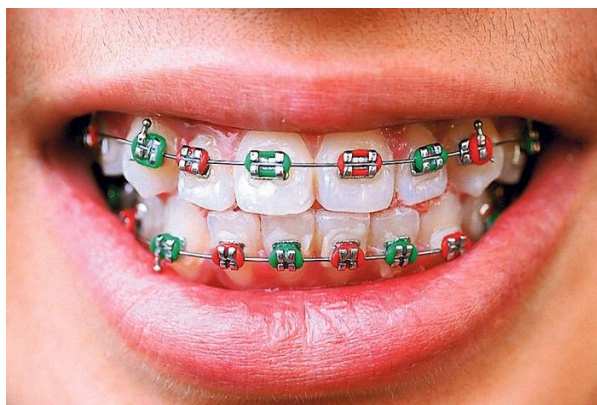
**Slika 1.12. Kontrolirano naginjanje [15]**

### 1.3.3 Ortodonska biomehanika

U ortodontske svrhe najčešće se koriste fiksni aparati za zube. Oni se koriste kada se mora ispraviti veći broj zubi ili kada postupak ispravljanja mora biti precizan. Pokretljivost zuba značajan je čimbenik u procjeni za njegovu uporabu. Postavljanjem fiksnih (bravice) aparata utječe se na rotaciju i translaciju zuba. Prilikom pomaka zuba uslijed te rotacije i translacije, dolazi i do pregradnje kosti u kojoj se zub nalazi.

Fiksni aparati sastoje se od bravica koje su zalijepljene na svaki zub, te žice koja ih povezuje i drugih žičanih ili gumenih elemenata. Bravice mogu biti metalne, plastične, keramičke ili kombinacija tih materijala.

Mogu se podijeliti na ligirajuće i samoligirajuće. Kod ligirajućih razlikujemo metalne bravice koje imaju preciznost pomaka, kompozitne bravice koje se preporučuju kod manjih nepravilnosti i kraće terapije te keramičke koje se ne troše i ne pigmentiraju. Kod samoligirajućih sistema žicu unutar bravice drže klipovi. Oni stvaraju blaže sile pa je pomak zuba brži.



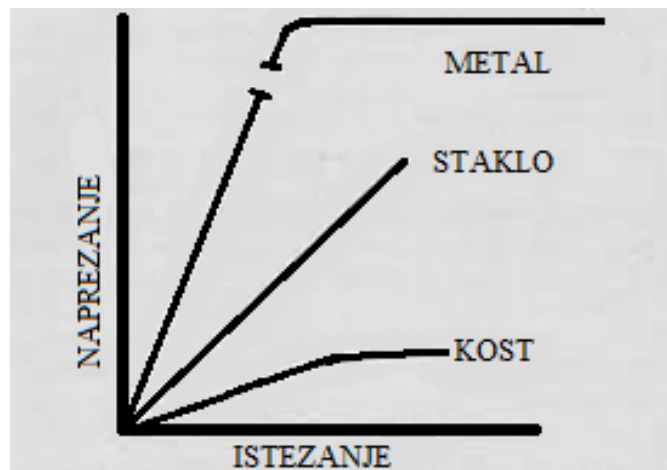
**Slika 1.13. Prikaz fiksnog aparata za zube s metalnom bravicom [16]**

## 1.4 Mehanička svojstva zubnih tkiva

Da bi se u potpunosti mogla izvršiti analiza naprezanja zuba, važan je izbor Youngova modula i Poissonova koeficijenta, odnosno određivanje mehaničkih svojstava materijala od kojeg su izgrađene strukture koje su zastupljene u modelu zuba [18].

Kost je klasificirana kao tvrda, kruta, anizotropna ili transversalno izotropna heterogena složena tvar. Mehanička svojstva kosti ovise o mnogim čimbenicima kao što su temperatura i vlaga tijekom testiranja, vrsti i strukturi koštanog tkiva, gustoći koštanog tkiva (normalno, osteoporoza – smanjenje mineralnog dijela koštane mase, osteopenija – početni

stadij osteoporoze kod koje je mineralna gustoća kostiju tek početno smanjena), stanje uzorka (svježa, konzervirana), dobi, spolu, bolestima, prehrani. Slika 1.14. prikazuje usporedbu mehaničkih svojstava kosti sa svojstvima metala i stakla.



**Slika 1.14. Usporedba mehanički svojstava kosti s drugim materijalima [19]**

U literaturi se nalazi veliki broj različitih vrijednosti mehaničkih svojstava materijala koje su upotrebljavane u istraživanjima. U Tablici 1.1. prikazane su vrijednosti modula elastičnosti te u Tablici 1.2. prikazan je Poissonov koeficijent. Vrijednosti modula elastičnosti i Poissonova koeficijenta koje su dane u tablicama prikazane su za caklinu, dentin, pulpu i PDL te kortikalnu i spongioznu kost te su svrstane s obzirom na znanstvenika koji je vršio ispitivanja.

Tablica 1.1. Vrijednosti modula elastičnosti [18]

	E, MPa					
	<b>Caklina</b>	<b>Dentin</b>	<b>Pulpa</b>	<b>PDL</b>	<b>Kortikalna kost</b>	<b>Spongiozna kost</b>
Yetram, Wright	$46.89 \times 10^3$	$11.76 \times 10^3$				
Zhou	$51.72 \times 10^3$	$18.62 \times 10^3$		3.45	$13.8 \times 10^3$	
Stanford	$46 \times 10^3$	$12 \times 10^9$				
Farah, Craig		$18.6 \times 10^3$	2.07			
Peyton		$18.6 \times 10^3$		50		
Cailleteau	$41.4 \times 10^3$	$18.6 \times 10^3$		68.9	$13.8 \times 10^3$	$0.345 \times 10^3$
Ko		$18.6 \times 10^3$			$13.7 \times 10^3$	$13.7 \times 10^3$
Knoel					$13.7 \times 10^3$	$0.689 \times 10^3$
Carter					$13.7 \times 10^3$	$0.689 \times 10^3$
Widera		$20.7 \times 10^3$		68.9		
Tanne	$19.6 \times 10^3$			0.67	$13.7 \times 10^3$	
Tresher	$41 \times 10^3$	$19 \times 10^3$	2.07			
Tanne, Sakuda	$19.6 \times 10^3$			0.67	$13.7 \times 10^3$	
Craig, Peyton	$83.3 \times 10^3$					
Grenoble		$20.6 \times 10^3$				
Williams, Edmundson	$80.9 \times 10^3$	$17.65 \times 10^3$	1.96	$(0.49-96.1) \times 10^3$	$331.5 \times 10^3$	$13.24 \times 10^3$

Tablica 1.2. Vrijednosti Poissonovog koeficijenta [18]

	v					
	<b>Caklina</b>	<b>Dentin</b>	<b>Pulpa</b>	<b>PDL</b>	<b>Kortikalna kost</b>	<b>Spongiozna kost</b>
Yetram, Wright	0.30	0.30				
Zhou	0.31	0.31		0.45	0.30	
Farah, Craig		0.31	0.45			
Peyton		0.31		50x10 <sup>6</sup>		
Cailleteau	0.30	0.32	0.45	0.30	0.26	0.38
Ko		0.31		0.45	0.30	0.30
Knoel					0.30	0.30
Carter					0.30	0.30
Widera		0.30	0.45			
Tanne	0.30			0.49	0.30	
Tresher	0.30	0.31	0.45			
Tanne, Sakuda	0.15			0.49	0.15	
Williams, Edmundson	0.33	0.31	0.45	0-0.45	0.26	0.38

## 2 METODOLOGIJA RADA

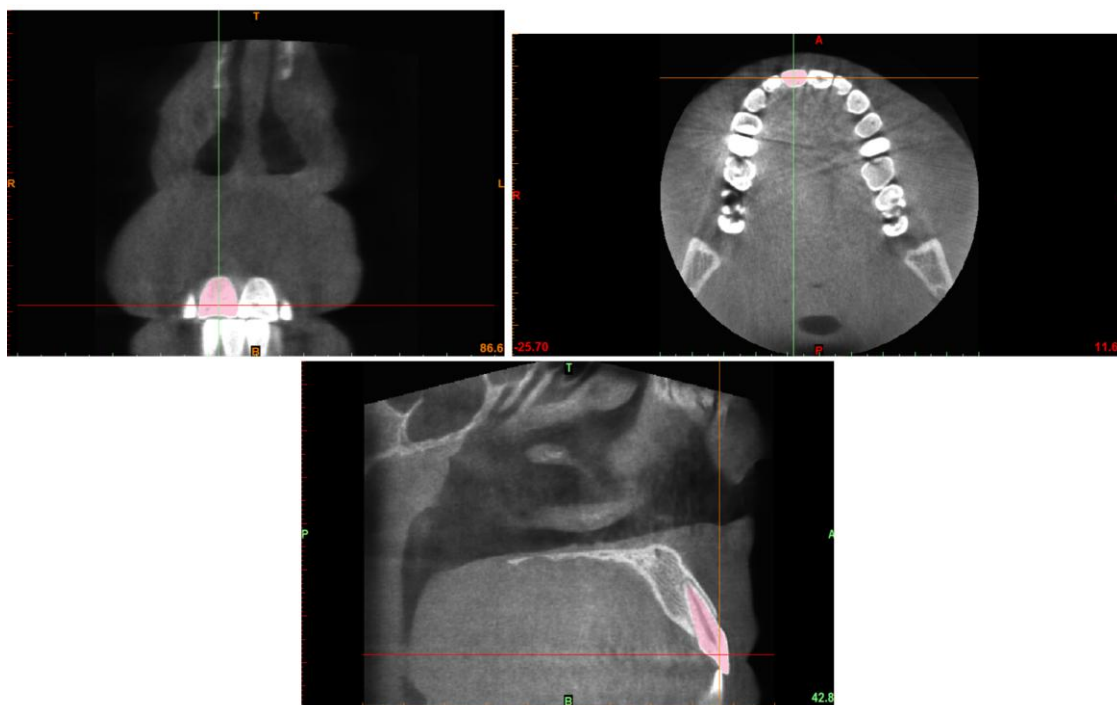
### 2.1 Mimics Medical 17.0

Za dobivanje modela gornjeg desnog sjekutića iz CT snimaka poslužio je programski paket Mimics Medical.

Programski paket Mimics [20] razvijen je za obradu medicinskih slika. Mimics se koristi za segmentaciju 3D medicinskih slika (koje dolaze od strane CT-a, MRI-a, micro-CT-a, CT-a s koničnom zrakom (CBCT), 3D ultrazvuka) i rezultat će biti jako točni 3D modeli pacijentove anatomije. Ti modeli se koriste za različite inženjerske primjene. Proizvodi Mimicsa su: Mimics, 3-Matic, PROPLAN CMF i Mimics Innovation Suite.

Broj CT snimaka gornjeg desnog sjekutića učitanih u Mimics je 375, a svaka snimka ima 250000 piksela. Prije nego su izrađene maske kosti i zuba, odabrane su vrijednosti HU, za zub od 685 do 3071, a za kost 226 do 3071. HU je jedinica Hounsfieldove ljestvice finog razlučivanja gustoće u kompjuteriziranoj tomografiji. Definirana je tisućinkom koeficijenta gušenja rendgenskog zračenja u vodi koja ima 0 HU.

Na slici 2.1. prikazana je dobivena maska zuba u sve tri ravnine: transversalnoj, aksijalnoj i sagitalnoj. Sljedeći korak je bio dobivanje 3D model zuba iz maske. 3D model je prikazan na slici 2.2.



**Slika 2.1. Prikaz maske zuba u tri ravnine**



**Slika 2.2. 3D model zuba**

## **2.2 Abaqus 6.10**

Abaqus [21] je programski paket baziran na metodi konačnih elemenata kojim možemo rješavati puno različitih problema, od najjednostavnijih linearnih do složenih nelinearnih problema. Sadrži ogromnu bazu elemenata kojima se može virtualno modelirati bilo kakva geometrija. Također je moguće modelirati mnoge materijale često korištene u strojarstvu (metale, polimere, kompozite, itd.). Abaqus se sastoji od dva osnovna proizvoda: Abaqus/Standard i Abaqus/Explicit.

## **2.3 Metoda konačnih elemenata**

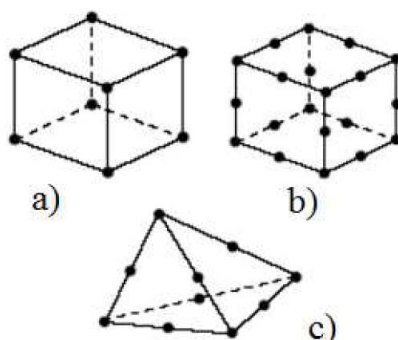
Metoda konačnih elemenata numerička je metoda koja je nezaobilazna u inženjerskim proračunima [22]. Primjenjuje se u mehanici deformabilnih tijela za rješavanje statičkih i dinamičkih problema i jednako tako za rješavanje općih problema polja kao što su proračun temperaturnih polja, proračun strujanja te analiza elektromagnetskih polja. Metoda konačnih elemenata je približna numerička metoda [22]. Svaki njezin korisnik treba imati na umu da su dobivena rješenja približna, a realnim vrijednostima mogu se približiti samo uz pravilan izbor proračunskog modela i uz pravilno odabrane konačne elemente koji su u mogućnosti opisati realni proces deformiranja [22].

Problem prijenosa sile i naprezanja na zube i okolna tkiva vrlo je složen zbog nehomogenosti struktura koje ih izgrađuju, nepravilnosti njihova oblika te složene unutrašnje morfologije. Kao što je navedeno u poglavlju 1, zub se sastoji od više različitih tkiva i svako to tkivo ima bitno različite značajke i svojstva. Zub promatramo kao realno i čvrsto mehaničko tkivo i ono pod djelovanjem vanjskih sila mijenja svoj oblik. Zbog gore navedenih problema, metoda konačnih elemenata se pokazala uspješnom u raščlambi prijenosa sila i naprezanja u biološkim sustavima.

Ova metoda se temelji na fizičkoj diskretizaciji kontinuuma, odnosno područje kontinuuma se dijeli na konačan broj potpodručja koja se nazivaju konačni elementi, tj. razmatrani kontinuum postaje mreža konačnih elemenata. Konačni elementi su međusobno povezani u točkama koje se nazivaju čvorovi, a stanje u svakom elementu (polje pomaka, deformacije, naprezanja, temperatura, itd.) opisuje se pomoću interpolacijskih funkcija. Najprije se izračunavaju karakteristične veličine u svakom konačnom elementu zasebno (lokalno), a zatim se mogu izračunati za cijelu konstrukciju (globalno) pomoću određenih transformacija. Uz pravilnu formulaciju konačnih elemenata, približavanje točnom rješenju raste s povećanjem broja elemenata [22].

Konačni elementi koji se koriste u metodi konačnih elemenata su štapni elementi, gredni elementi, ljuskasti elementi i 3D konačni elementi.

Za analizu u ovom zadatku korišteni su 3D konačni tetraedarski elementi prvog reda, radi kompleksnosti svoje geometrije. Na taj način ćemo imati manji broj stupnjeva slobode nego što bi to bilo kada bi koristili jednodimenzijske ili dvodimenzijske konačne elemente. Slika 2.3. prikazuje najčešće korištene 3D elemente.



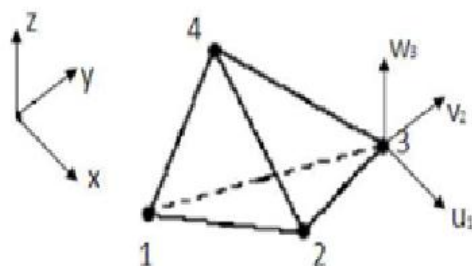
**Slika 2.3. Često korišteni 3D elementi: a) heksaedarski element prvog reda, b) heksaedarski element drugog reda, c) tetraedarski element drugog reda [22]**

### Osnovni tetraedarski element

Najjednostavniji konačni element za trodimenzijsku analizu kontinuuma osnovni je tetraedarski element (slika 2.4.) s 12 stupnjeva slobode [22]. Element se sastoji od 4 čvora s vrhovima tetraedra s po tri komponente pomaka,  $u$ ,  $v$  i  $w$ , u pravcu Kartezijevih koordinatnih osi [22]. Stupnjevi slobode komponente pomaka u čvorovima:

$$\mathbf{v}^T = [u_1 \ v_1 \ w_1 \ u_2 \ v_2 \ w_2 \ u_3 \ v_3 \ w_3 \ u_4 \ v_4 \ w_4] \quad (2.1.)$$





Slika 2.4. Osnovni tetraedarski konačni element [22]

## 2.4 3D model zuba

### 2.4.1 Mehanička svojstva

Dodijeljena su i mehanička svojstva zuba i kosti, koja je podijeljena na trabekularnu i kortikalnu kost (slika 2.5.). Mehanička svojstva koja su se koristila prilikom numeričke analize u ovom radu su linearno elastična te su dana u Tablici 2.1.

Tablica 2.1. Mehanička svojstva materijala analiziranog modela [23], [24]

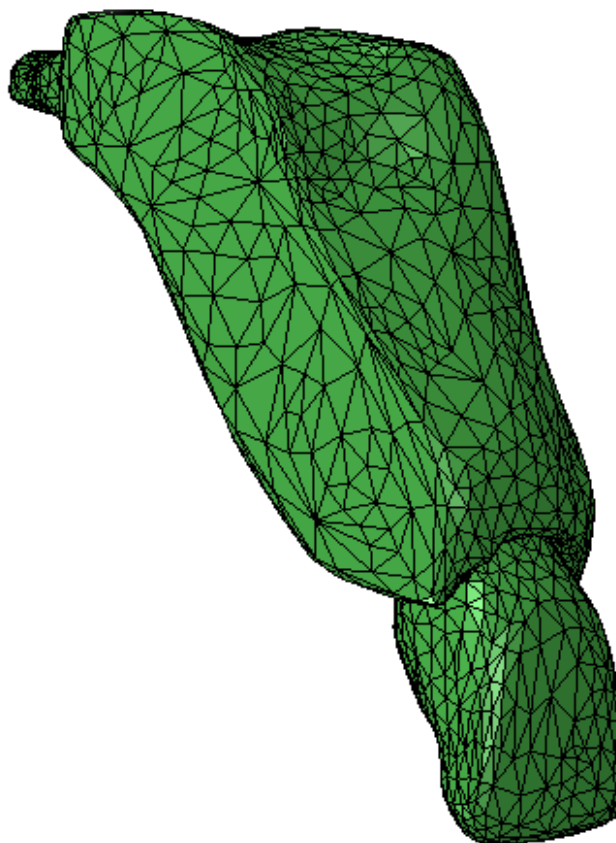
	Modul elastičnosti, MPa	Poissonov koeficijent
Kortikalna kost	13800	0.26
Trabekularna kost	345	0.38
Zub	20000	0.15



**Slika 2.5. Prikaz mehaničkih svojstava**

#### **2.4.2 Mreža konačnih elemenata**

U programskom paketu Abaqus/CAE vršena je analiza gdje je napravljena i mreža konačnih elemenata na 3D modelu zuba i kosti (slika 2.6.). Svakom modelu zasebno je dodijeljena mreža, a nakon toga su naknadno spojeni u jedan model. Korišteni su 3D konačni tetraedarski elementi prvog reda. Kao što je opisano u podpoglavlju 2.3, elementi imaju 4 vrha i u svakom po tri stupnja slobode ( $u$ ,  $v$  i  $w$ ), što znači da svaki element sveukupno ima 12 stupnjeva slobode.

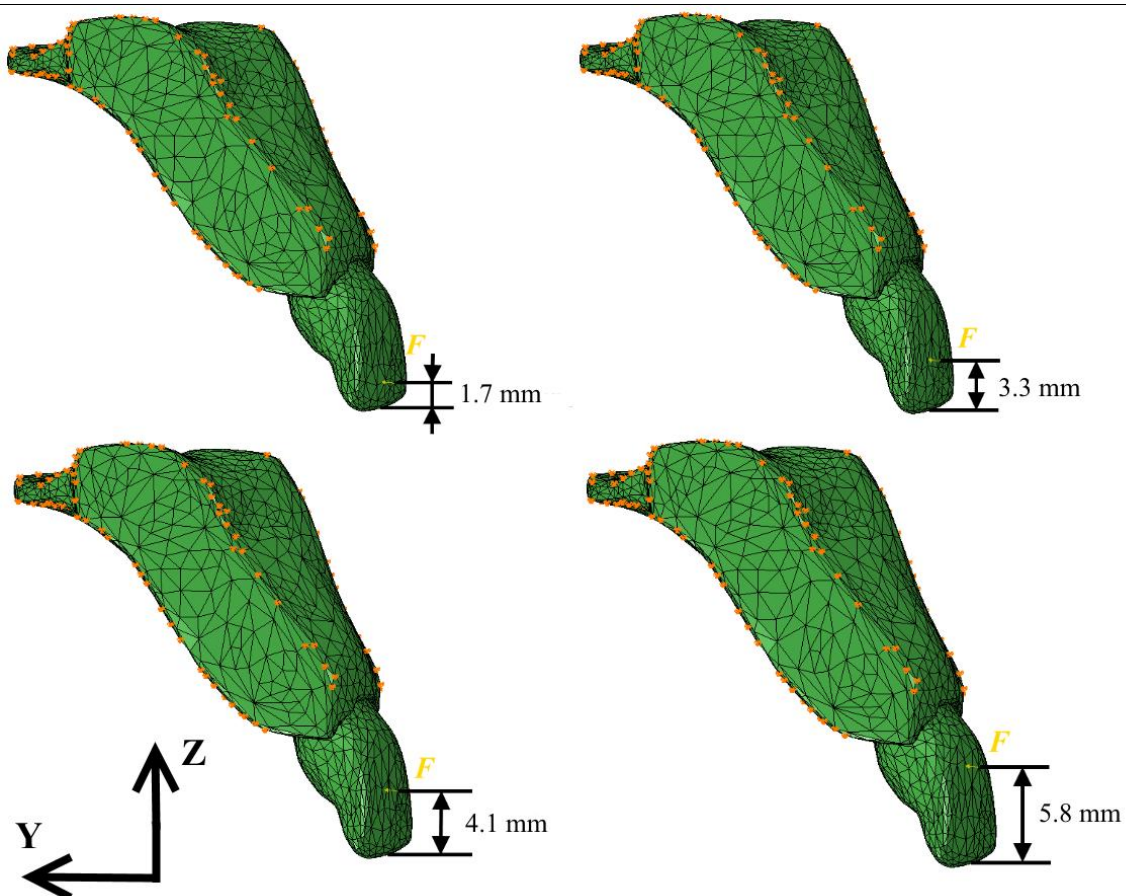


**Slika 2.6. Mreža konačnih elemenata cijelog modela**

Model se sastoji od ukupno 4385 čvorova i 16331 konačnih elemenata u modelu kosti sa zubom.

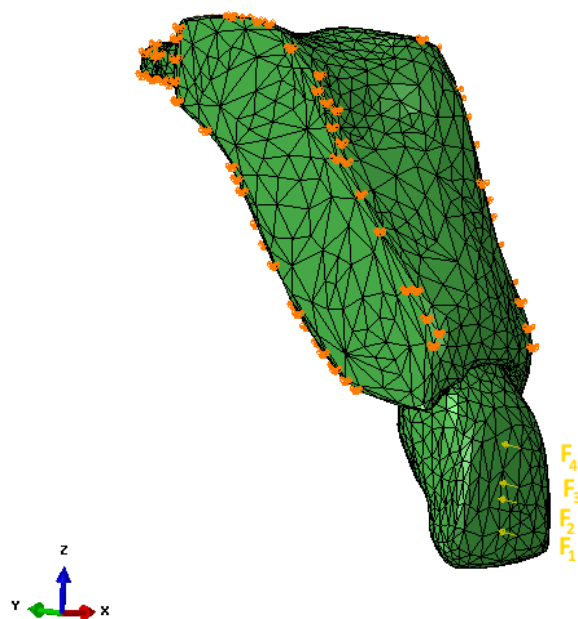
#### **2.4.3 Opterećenja i rubni uvjeti**

Model zuba je analiziran djelovanjem koncentrirane sile iznosa 5 N [26]. Koncentrirana sila predstavlja položaj bravice na zub te je postavljena u smjeru osi y globalnog koordinatnog sustava. Postavljena su četiri hvatišta sile koja su definirana udaljenošću od vrha krune zuba. Prvo hvatište se nalazilo na udaljenosti od 1.7 mm od vrha krune zuba, drugo na 3.3 mm, treće na 4.1 mm i četvrto hvatište sile je bilo na 5.8 mm od vrha krune zuba. Prikaz hvatišta i njihova udaljenost od vrha zuba su prikazani na slici 2.7.



Slika 2.7. Udaljenosti hvatišta sila od vrha krune zuba

Kosti koja okružuje zub su onemogućeni pomaci u sve tri koordinatne osi (slika 2.8.).



Slika 2.8. Prikaz opterećenja i uklještenja na jednoj slici za sve četiri analize

Također se koristio rubni uvjet kontakta pod nazivom Tie. Njime je spojen dio zuba koji se nalazi u kosti s unutarnjim dijelom kosti u koji dolazi zub te je na taj način omogućeno da zub pri pomaku ne izlazi iz kosti.

#### **2.4.4 Analiza 3D modela zuba**

Analizom metodom konačnih elemenata prikazan je položaj centra rotacije prilikom različitog položaja bravice na zub, točnije različitih hvatišta sila na krunu zuba. Analizirano je nekontrolirano naginjanje zuba, vrsta pomaka zuba prilikom ortodontske terapije, gdje je očekivani položaj centra rotacije u korijenu zuba. Oko centra rotacije dolazi do rotiranja zuba, gdje kruna zuba ide u jednu stranu, u smjeru djelovanja sile, a korijen zuba, od centra rotacije do vrha korijena zuba, u suprotnu stranu. Prilikom ove vrste pomaka zuba, u centru rotacije nema pomaka zuba, tj. pomak je jednak nuli. U slučaju provedene analize, pomak u smjeru osi y je jednak nula i definiran je kao pomak  $u_2$ . Stoga je centar rotacije definiran tamo gdje je vidljivo da je pomak  $u_2=0$ .

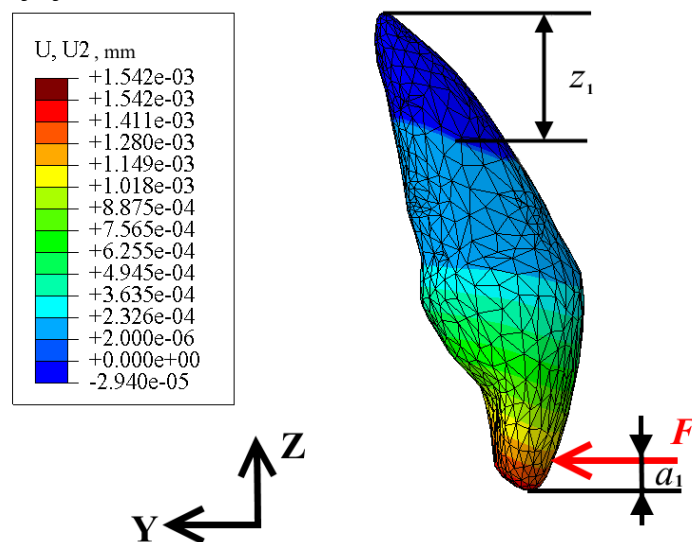
Cilj rada je bio pokazati osjetljivost položaja bravice, koja se nalazi na kruni zuba, na centar rotacije, pa samim time i na konačan položaj zuba nakon ortodontske terapije. Stoga su provedene četiri različite analize koje su imale različita hvatišta sile, kao što je navedeno u podpoglavlju 2.4.3. Rubni uvjeti su zadržani isti u sve četiri analize, kao i iznos sile.

### 3 REZULTATI

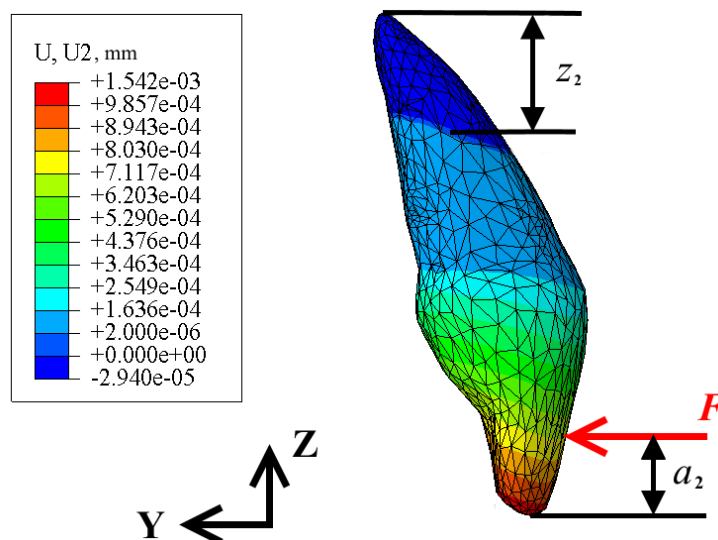
Kao što je opisano u prethodnom poglavlju, vršene su četiri različite analize u cilju pokazivanja ovisnosti centra rotacije o hvatištu sile. Slike 3.1., 3.2., 3.3. i 3.4. prikazuju rezultate analize za sva četiri hvatišta sile.

Na slikama 3.1., 3.2., 3.3. i 3.4. prikazani su centri rotacije (gdje je pomak u smjeru osi  $y$ , definiran kao  $u_2$ , jednak 0) kod svake analize. Kotirana je udaljenost centra rotacije od vrha korijena zuba,  $z_i$  i hvatište sile od vrha krune zuba,  $a_i$ .

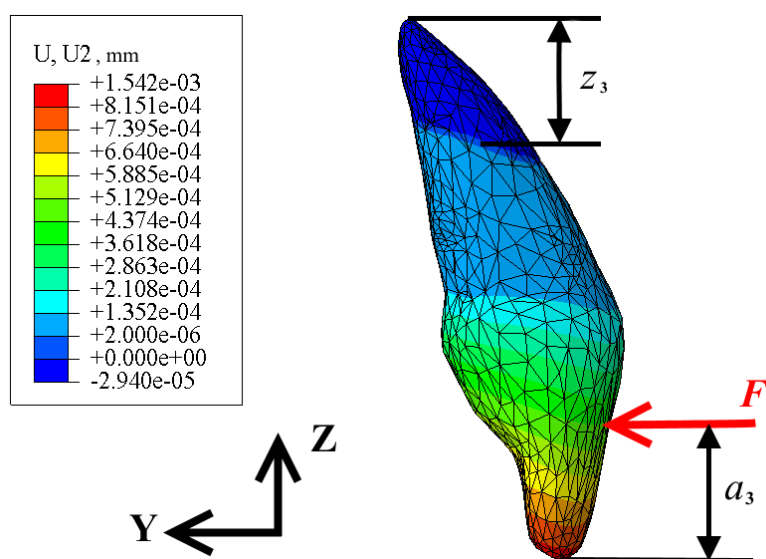
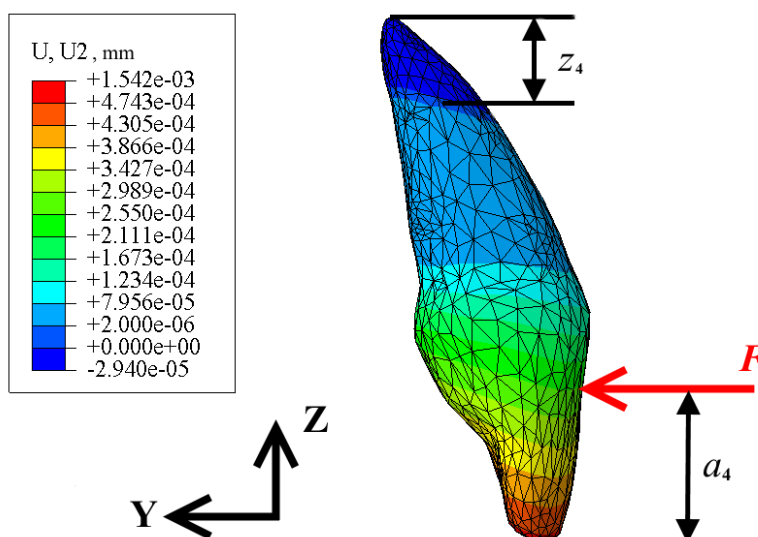
Kao što je vidljivo iz slike, najveći pomaci zuba su kod sve četiri analize kod vrha krune zuba, gdje su vrijednosti pomaka zuba pri vrhu korijena zuba znatno manje, dok su u položaju centra rotacije jednake nuli.



Slika 3.1. Pomak  $u_2$  kod hvatišta 1



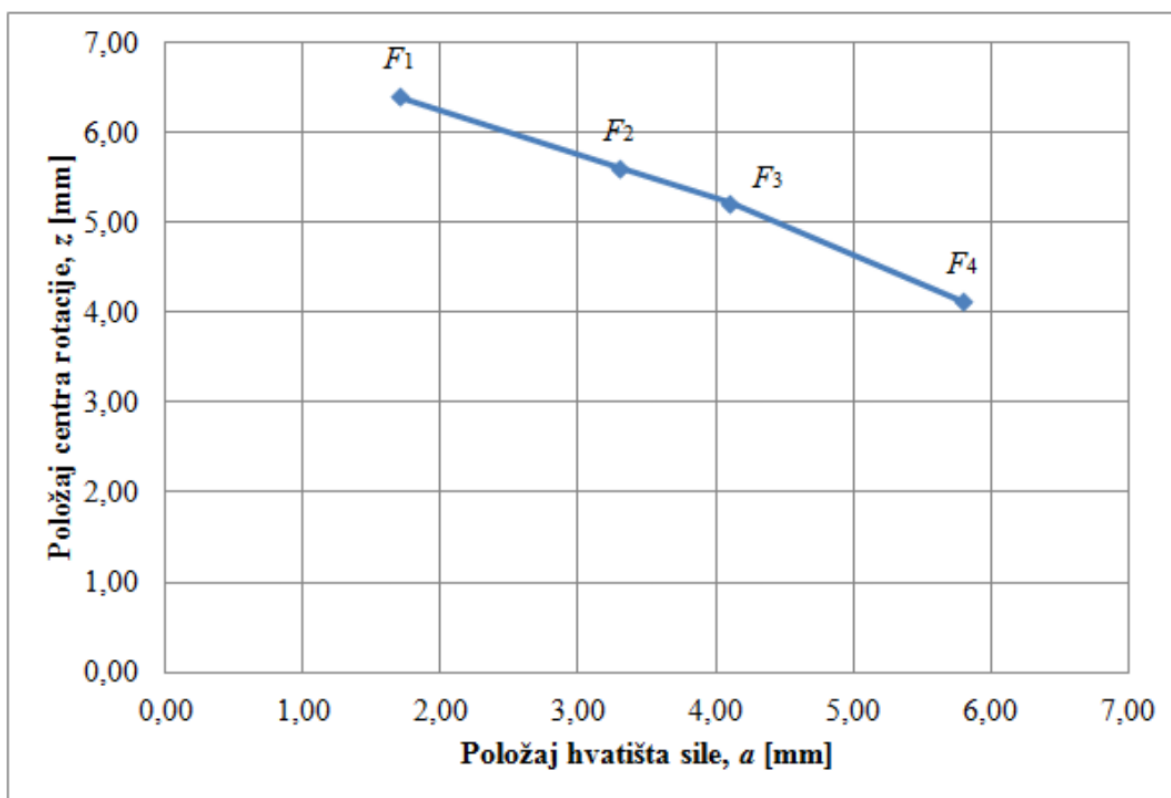
Slika 3.2. Pomak  $u_2$  kod hvatišta 2

Slika 3.3. Pomak  $u_2$  kod hvatišta 3Slika 3.4. Pomak  $u_2$  kod hvatišta 4

## 4 DISKUSIJA

Provedene analize su pokazale osjetljivost položaja hvatišta sile, pa samim time i položaja bravice i centra rotacije. Iz analiza je vidljivo kako se položaj hvatišta sile pomiče te ujedno i primiče vratu zuba, položaj centra rotacije se isto tako pomiče.

Slika 4.1. prikazuje ovisnost položaja centra rotacije o položaju hvatišta sile. Vidljivo je da kako se povećava udaljenost hvatišta sile, udaljenost centra rotacije od vrha korijena zuba se smanjuje. Za udaljenost hvatišta sile  $F_1$ , koja iznosi 1.7 mm, centar rotacije se nalazi na udaljenosti od 6.41 mm od vrha korijena. Kada je udaljenost hvatišta sile  $F_2$  3.3 mm, udaljenost centra rotacije je 5.61 mm. U trećoj analizi, kada se hvatište sile  $F_3$  nalazi na udaljenosti od 4.1 mm od vrha krune, centar rotacije je na udaljenosti od 5.22 mm od vrha korijena, dok je u četvrtoj analizi udaljenost hvatišta sile  $F_4$  5.8 mm, a udaljenost centra rotacije 4.12 mm.



Slika 4.1. Ovisnost položaja centra rotacije o položaju hvatišta sile



## 5 ZAKLJUČAK

Biomehanika je područje koje proučava utjecaj mehanike na biološki sustav, pa se samim time može primijeniti na zub i njegovo gibanje. Ortodoncija je grana dentalne medicine koja brine o pravilnoj formaciji zuba i utjecaja mobilnih i fiksnih aparata na njih. Glavni zadatak je da zubi pravilno funkcioniraju tijekom govora, žvakanja i kada je čeljust opuštena.

Mobilni i fiksni aparati upotrebljavaju se kod problema sa žvakanjem ili kod boli čeljusti koja je nastala uslijed nepravilnog razvoja zuba. Mobilni aparati se koriste najčešće kod djece i kod manjih pomaka zuba, dok se fiksni koriste kada je veći broj zubi izvan normalnog položaja. Utjecaj obje vrste aparata je isti, transliraju i rotiraju zub te ga na taj način vraćaju u neutralni položaj u dentalnom luku.

U ovom radu je promatrana vrsta pomaka zuba koja se zove nekontrolirano naginjanje zubi. Prilikom nekontroliranog naginjanja zuba, položaj centra rotacije bitno utječe na konačan položaj zuba u čeljusti. Stoga je analiziran utjecaj položaja bravice, pomoću koncentrirane sile, na položaj centra rotacije.

Analiza je pokazala da je položaj centra rotacije izuzetno osjetljiv na položaj postavljanja bravice, te da ovisno o mjestu postavljanja bravice na zub, ovisi krajnji položaj zuba u čeljusti. Stoga je važno pri početku ortodonske terapije procijeniti krajnji, željeni, položaj zuba i tek onda staviti bravicu na zub. Biomehanika iznimno utječe na ortodonsku terapiju.

## 6 LITERATURA

- [1] <https://hr.wikipedia.org>, kolovoz 2015.
- [2] Gnatologija@net, 2001, <http://gnato.sfzg.hr>, kolovoz 2015.
- [3] <http://www.ortodoncija-reljanovicprotega.hr/fiksni.html>, kolovoz 2015.
- [4] <http://www.mojstomatolog.com.hr/razvoj-zuba/>, kolovoz 2015.
- [5] T. Jurčević Lulić: Dentalna biomehanika (Prezentacija za predavanje), 2014.
- [6] <http://www.respecta.co.rs/2010/08/08/kojim-redom-ide-nicanje-zuba/>, kolovoz 2015.
- [7] <http://beautyandhealthsolution.com/teeth-structure/>, kolovoz 2015.
- [8] <http://medical-dictionary.thefreedictionary.com>, kolovoz 2015.
- [9] [www.lookfordiagnosis.com](http://www.lookfordiagnosis.com), kolovoz 2015.
- [10] S. J. Nelson and M. M. Ash: Wheeler's dental anatomy, physiology, and occlusion. Saunders, Elsevier, St. Louis, Missouri, USA, 2010.
- [11] [https://bib.irb.hr/datoteka/303794.07\\_Endodontsko\\_lijecenje\\_zuba.pdf](https://bib.irb.hr/datoteka/303794.07_Endodontsko_lijecenje_zuba.pdf), kolovoz 2015.
- [12] <http://www.sfzg.unizg.hr>, kolovoz 2015.
- [13] <http://www.mojstomatolog.com.hr/grada-zuba-i-parodonta/>, kolovoz 2015.
- [14] <http://www.infodentis.com/tooth-anatomy/supporting-structure.html>, kolovoz 2015.
- [15] <http://www.dentalpedia.ca>, kolovoz 2015.
- [16] <http://www.forum.hr/showthread.php?t=723565&page=396>, kolovoz 2015.
- [17] Lindhe, J.L., N.P.L, T.K.: *Clinical Periodontology and Implant Dentistry*, Blackwell Munksgaard, Oxford 2008.
- [18] Meštrović S., Šlaj M Mikšić: *Raščlamba naprezanja i deformacija nastalih djelovanjem ortodontske sile na zub metodom konačnih elemenata*, Acta Stomat Croat 2002.
- [19] Black J., Hastings G.: *Handbook of Biomaterial Properties*, Chapman & Hall, London 1998.
- [20] <http://biomedical.materialise.com/mimics>, kolovoz 2015.
- [21] Abaqus 6.8.1. Documentation, Abaqus/CAE User's manual, ABAQUS Inc
- [22] Sorić J.: *Metoda konačnih elemenata*, Zagreb 2004.
- [23] C. G. Provatidis: *A comparative fem-study of tooth mobility using isotropic and anisotropic models of the periodontal ligament*, Medical Engineering and Physics 22(5): 359–370, 2000.
- [24] J. H. Marangalou, F. Ghalichi, and B. Mirzakouchaki: *Numerical simulation of orthodontic bone remodeling*, American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics 68: 64–71, 2009.
- [25] H. An Y., A. Draughn R.: *Mechanical Testing of Bone and the Bone-Implant Interface*, CRC Press, Florida 2000.

- [26] H. H. Ammar, P. Ngan, R. J. Crout, V. H. Mucino, and O. M. Mukdadi: *Threedimensional modeling and finite element analysis in treatment planning for orthodontic tooth movement*, American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics 139(1): 59–71, 2011.